

(12) NACH DEM VERTRAG ÜBER DIE INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT AUF DEM GEBIET DES
PATENTWESENS (PCT) VERÖFFENTLICHTE INTERNATIONALE ANMELDUNG(19) Weltorganisation für geistiges Eigentum
Internationales Büro(43) Internationales Veröffentlichungsdatum
9. Dezember 2004 (09.12.2004)

PCT

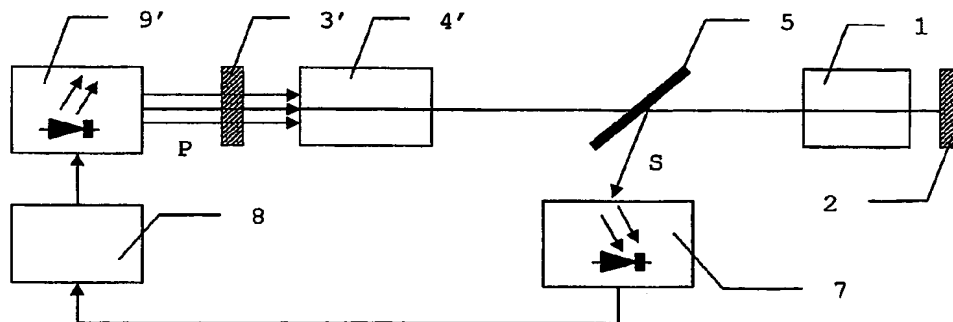
(10) Internationale Veröffentlichungsnummer
WO 2004/107513 A2

- (51) Internationale Patentklassifikation⁷: **H01S 5/00** (71) Anmelder (für alle Bestimmungsstaaten mit Ausnahme von US): **HIGH Q LASER PRODUCTION GMBH** [AT/AT]; Kaiser-Franz-Josef-Strasse 61, A-6845 Hohenems (AT).
- (21) Internationales Aktenzeichen: **PCT/EP2004/005812** (72) Erfinder; und (75) Erfinder/Anmelder (nur für US): **KOPF, Daniel** [AT/AT]; Sandholzerstrasse 14, A-6844 Altach (AT). **LEDERER, Maximilian, Josef** [DE/AT]; Schwarzen 687, A-6861 Alberschwende (AT). **MORGNER, Uwe** [DE/DE]; Würthstrasse 1 c, 76776 Neuburg/Rhein (DE).
- (22) Internationales Anmeldedatum:
28. Mai 2004 (28.05.2004)
- (25) Einreichungssprache: **Deutsch**
- (26) Veröffentlichungssprache: **Deutsch**
- (30) Angaben zur Priorität:
60/474,250 30. Mai 2003 (30.05.2003) US
01987/03 21. November 2003 (21.11.2003) CH
- (74) Anwalt: **KAMINSKI, Susanne**; Büchel, Kaminski & Partner, Austrasse 79, FL-9490 Vaduz (LI).
- (81) Bestimmungsstaaten (soweit nicht anders angegeben, für jede verfügbare nationale Schutzrechtsart): AE, AG, AL,

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

(54) Title: METHODS AND DEVICES FOR SUPPRESSING NON-LINEAR DYNAMIC EFFECTS IN A LASER

(54) Bezeichnung: VERFAHREN UND VORRICHTUNGEN ZUM UNTERDRÜCKEN VON EFFEKTEN NICHTLINEARER DYNAMIK IN EINEM LASER



(57) Abstract: The invention relates to methods for suppressing or preventing non-linear effects, such as bifurcations of the emitted intensity, in lasers. Also disclosed are laser arrays which are configured so as to be operated without allowing such effects to occur. In order to suppress non-linear effects in the laser emission, the parameters of the laser array are selected such that non-linear effects are prevented from occurring from the start and the laser emits in an inherently stable manner. Alternatively, operation of the laser is dynamically regulated by varying at least one adjustable variable that influences laser emission in accordance with at least one error signal which is based on the extracted pulse energy of the laser emission in such a way that an unstable behavior of the laser emission is prevented or suppressed.

(57) Zusammenfassung: Die Erfindung betrifft damit Verfahren zum Unterdrücken bzw. Vermeiden von nichtlinearen Effekten, wie z.B. Bifurkationen der emittierten Intensität, bei Lasern bzw. sie betrifft solche Laseranordnungen, die erfindungsgemäss so ausgebildet werden, dass sie ohne das Auftreten von solchen Effekten betrieben werden können. Zur Unterdrückung der nichtlinearen Effekten in der Laseremission werden entweder die Parameter der Laseranordnung so gewählt, dass ein Auftreten nichtlinearer Effekte von vornherein vermieden wird und der Laser inhärent stabil emittiert. Oder es wird der Betrieb des Lasers dynamisch geregelt, indem wenigstens

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]



AM, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KP, KR, KZ, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LV, MA, MD, MG, MK, MN, MW, MX, MZ, NA, NI, NO, NZ, OM, PG, PH, PL, PT, RO, RU, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SY, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, YU, ZA, ZM, ZW.

TJ, TM), europäisches (AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HU, IE, IT, LU, MC, NL, PL, PT, RO, SE, SI, SK, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

Veröffentlicht:

— ohne internationalen Recherchenbericht und erneut zu veröffentlichen nach Erhalt des Berichts

(84) **Bestimmungsstaaten** (soweit nicht anders angegeben, für jede verfügbare regionale Schutzrechtsart): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LS, MW, MZ, NA, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasisches (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU,

Zur Erklärung der Zweibuchstaben-Codes und der anderen Abkürzungen wird auf die Erklärungen ("Guidance Notes on Codes and Abbreviations") am Anfang jeder regulären Ausgabe der PCT-Gazette verwiesen.

Verfahren und Vorrichtungen zum Unterdrücken von Effekten nichtlinearer Dynamik in einem Laser

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Unterdrücken von Effekten nichtlinearer Dynamik nach Anspruch 1, eine Steuerung zur Unterdrückung von Effekten nichtlinearer Dynamik in einer Laseremission nach Anspruch 9, hochrepetierende Laser nach Anspruch 12 und dem Oberbegriff des Anspruchs 13, ein Verfahren zur Berechnung von Parametern für einen im Grenzbereich nichtlinearer Dynamik inhärent stabilen Laser nach dem Prinzip des wiederherstellbaren Verstärkers nach Anspruch 19 und ein Computerprogrammprodukt nach Anspruch 20.

Die Erfindung betrifft damit ein Verfahren zum Unterdrücken bzw. Vermeiden von Effekten nichtlinearer Dynamik, wie z.B. Bifurkationen der emittierten Intensität, bei Lasern bzw. sie betrifft solche Laseranordnungen, die erfindungsgemäss so ausgebildet werden, dass sie ohne das Auftreten von solchen Effekten betrieben werden können.

Für die Erzeugung von Laserpulsen mit Energien im μJ - bis mJ-Bereich mit Repetitionsraten um 1 bis 100 kHz existieren bekannte Verfahren. In Verstärkungsmedien mit langer Fluoreszenz-Lebensdauer τ_L kann durch dauerhaftes Pumpen eine hohe Populationsinversion akkumuliert werden. Der mit der langen Lebensdauer verknüpfte kleine Wirkungsquerschnitt σ_L verhindert allerdings, dass ein Laserpuls diese Inversion in wenigen Durchläufen durch das Verstärkungsmedium sich verstärkend vollständig abbauen kann. Deswegen sind Multipass-Verstärker (mit ca. 10 Umlaufen) nur in Medien mit hohem Wirkungsquerschnitt (z.B. Ti:Sa) realisierbar. In allen anderen Fällen sind

regenerative Verstärker (RV) die Methode der Wahl. Ein elektro-optischer Modulator (EOM) dreht in Abhängigkeit der anliegenden äußeren Spannung den Polarisationsvektor des resonatorinternen Lichtfeldes. Mit Spannung $U=U_1$ wird ein Puls aus dem Resonator ausgekoppelt bzw. kann ein Puls in den Resonator eingekoppelt werden. Mit Spannung $U=U_2$ ist die Güte des durch die hochreflektierenden Spiegel gebildeten Resonators hoch, so dass der Puls theoretisch verlustfrei durch den Resonator und das Verstärkungsmedium laufen kann. Die Umlaufzeit des Resonators sei T_R . Die Gatelänge T_G beschreibt die Dauer, während der die Resonatorgüte durch Anlegen einer Spannung U_2 am EOM hoch ist. T_G ist ein ganzzahliges Vielfaches der Umlaufzeit T_R . Die gewünschte Repetitionsrate der hochenergetischen Pulse wird durch die Zeitkonstante T_K vorgegeben.

Wie oben erläutert, ist die Funktion des RV in zwei aufeinander folgende und immer wiederkehrende Phasen separierbar:

• Phase 1, zwischen den Gates:

Die Spannung am EOM ist $U=U_1$, die Resonatorgüte ist nahe Null, kein signifikantes Lichtfeld kann sich im Resonator aufbauen. Trotzdem wird Pumplicht eingestrahlt, und im Verstärkungsmedium akkumuliert sich während der Dauer $T_K=T_G$ eine Populationsinversion. Der aus der Inversion resultierende Gewinn g wird durch folgende Differentialgleichung beschrieben

$$\frac{dg}{dt} = \frac{g_0 - g}{\tau_L} \quad (1)$$

Dabei beschreibt g den Leistungsgewinn, g_0 ist die zur Pumpleistung proportionale Kleinsignalverstärkung, und τ_L ist die Fluoreszenz-Lebensdauer im oberen Laserniveau des Verstärkungsmediums. Sei die Verstärkung am Beginn von Phase 1 $g(0)=g_1$ und am Ende $g(T_K-T_G)=g_2$, so lässt sich Gl. (1.1) geschlossen lösen, und es gilt

$$g_2 = g_0 + (g_1 - g_0) e^{\left(\frac{T_K - T_G}{\tau_L} \right)} \quad (2)$$

10

• Phase 2, im Gate:

Die Spannung am EOM ist $U=U_2$, die Resonatorgüte ist hoch, die verbleibenden Leistungsverluste l im Resonatorumlauf sind klein, ein Puls mit Energie E_{seed} wurde injiziert und wird mit jedem Umlauf verstärkt. Immer noch wird Pumplicht eingestrahlt. Die Dynamik des Gewinns g und der Pulsenergie E während dieser Phase wird durch die folgenden gekoppelten Differentialgleichungen beschrieben:

20

$$\begin{aligned} \frac{dg}{dt} &= \frac{g_0 - g}{\tau_L} - \frac{gE}{E_{sat} T_R} \\ \frac{dE}{dt} &= \frac{E}{T_R} (g - l) \end{aligned} \quad (3) \text{ und } (4)$$

Dabei ist E_{sat} die Sättigungsenergie des Verstärkungsmediums. Die Anfangsbedingungen in dieser Phase sind:

25

$$\begin{aligned} E(0) &= E_{seed} \\ g(0) &= g_2 \end{aligned}$$

Damit ist das System vollständig beschrieben. Ein konkreter Fall sei ein Nd:Glas-Verstärker, für den folgende Konstanten gelten:

$$\lambda = 1050 \text{ nm}$$

$$\tau_L = 0.323 \text{ ms}$$

$$5 \quad \sigma = 4.5 \cdot 10^{-24} \text{ m}^2 \quad (5-9)$$

$$A_{\text{eff}} = \pi \cdot (80 \text{ } \mu\text{m})^2$$

$$E_{\text{sat}} = \frac{hcA_{\text{eff}}}{2\sigma\lambda} = 423 \text{ } \mu\text{J}$$

Regenerative bzw. wiederherstellbare Verstärker werden beispielsweise in der US Patentanmeldung No. 10/006,396 und der Europäischen Patentanmeldung EP 1 318 578 beschrieben.

10 Beide Dokumente werden hier als durch Referenzierung vollumfänglich einbezogen betrachtet.

In Abhängigkeit von speziellen Parameterkonstellationen, insbesondere bei steigender Repetitionsrate, können bei

15 Laseranordnungen wie den Regenerativen Verstärkern dynamische Instabilitäten auftreten, die sich in der Existenz von mehreren wechselnden Emissionsintensitäten äußern. Neben dem Auftreten von reinen Bifurkationen können dabei auch vierfache Zustände bis hin zu chaotischem

20 Verhalten beobachtet werden.

Eine Aufgabe besteht darin, eine Vorrichtung und ein Verfahren bereitzustellen, mit dem bei Auftreten von Instabilitäten eine Stabilisierung des Laserbetriebs und

25 der Emissionsparameter erreicht werden.

Eine weitere Aufgabe besteht in der Bereitstellung eines Verfahrens zur Ableitung von geeigneten, insbesondere materialabhängigen Parameterkonstellationen, die eine

Auslegung von gattungsgemäßen Lasern für einen Betrieb ohne Auftreten von Instabilitäten ermöglichen.

5 Eine Aufgabe besteht in der Bereitstellung von gattungsgemäßen Lasern, die einen inhärent stabilen Betrieb auch bei hohen Repetitionsraten ermöglichen.

10 Eine weitere Aufgabe besteht in der Bereitstellung eines dynamisch inhärent stabilen Lasers, der ohne Einkopplung von externen Seed-Pulsen als Regenerativer Verstärker, auch in Grenzbereichen nichtlinearer Dynamik, betrieben werden kann.

15 Diese Aufgaben werden erfindungsgemäss durch Merkmale des Anspruchs 1, 9, 12, 13 bzw. 19 oder durch Merkmale der Unteransprüche gelöst bzw. weitergebildet.

20 Die erfindungsgemässe Lösung dieser Aufgaben bzw. deren Fortbildung beruht auf der Kenntnis bzw. Analyse der nichtlinearen Dynamik des Lasers. Das Vermeiden von Instabilitäten erfolgt dabei entweder auf der direkten Steuerung des Laserbetriebs oder aber auf der Auslegung eines Lasers mit für einen stabilen Betrieb geeigneten Parameterkonstellationen. Grundsätzlich können beide
25 Ansätze auch in einem gemeinsamen Ansatz kombiniert werden.

Die erfindungsgemäße Lösung der Aufgaben basiert auf einer allgemeinen Analyse von Regenerativen Verstärkern (RV) in Laseranordnungen. Im folgenden soll die Dynamik der Energie
30 $E(t)$ und der Verstärkung $g(t)$ des RV als Funktion der Parameter g_0 , E_{seed} , l , T_R , T_K , T_G durch numerische Lösung der Gleichungen (1) - (4) untersucht werden.

Das numerische Modell betrachtet zwei unterschiedliche Phasen, die durch das Schalten des Gates zum Ein- bzw. Auskoppeln eines Laserpulses unterschieden werden.

5 • Phase 1, zwischen den Gates:

Die vollständige Beschreibung der Dynamik des RV während der Phase 1 geschieht analytisch mittels Gl. (2).

10 • Phase 2, im Gate:

Während Phase 2 müssen die Gl. (3 ff.) gelöst werden. Das geschieht mit Hilfe eines Runge-Kutta-Verfahrens vierter Ordnung wie es beispielsweise in W. Press, S. Teukolsky, W. Vetterling, B. Flannery, „Numerical Recipes in C“, Cambridge University Press, New York, 1992 dargestellt ist. Bei zeitlicher Schrittweite h liefert dieses Verfahren eine Lösung des Differentialgleichungssystems mit einem Fehler der Ordnung $O(h^4)$. Wird das Gleichungssystem (3 ff.)
20 umgeschrieben als

$$\begin{aligned}\frac{dg}{dt} &= D_g(g, E) \\ \frac{dE}{dt} &= D_E(g, E)\end{aligned}\tag{10} \text{ und } (11)$$

dann werden $E(t+h)$ und $g(t+h)$ aus $E(t)$ und $g(t)$ durch
25 folgendes Verfahren berechnet:

$$\begin{aligned}K_1 &= hD_g(g(t), E(t)) \\ H_1 &= hD_E(g(t), E(t))\end{aligned}\tag{12} \text{ und } (13)$$

$$K_2 = hD_E \left(g(t) + \frac{H_1}{2}, E(t) + \frac{K_1}{2} \right) \quad (14) \text{ und } (15)$$

$$H_2 = hD_g \left(g(t) + \frac{H_1}{2}, E(t) + \frac{K_1}{2} \right)$$

$$K_3 = hD_E \left(g(t) + \frac{H_2}{2}, E(t) + \frac{K_2}{2} \right) \quad (16) \text{ und } (17)$$

$$H_3 = hD_g \left(g(t) + \frac{H_2}{2}, E(t) + \frac{K_2}{2} \right)$$

$$K_4 = hD_E (g(t) + H_3, E(t) + K_3) \quad (18) \text{ und } (19)$$

$$H_4 = hD_g (g(t) + H_3, E(t) + K_3)$$

$$g(t+h) = g(t) + \frac{H_1}{6} + \frac{H_2}{3} + \frac{H_3}{3} + \frac{H_4}{6} \quad (20) \text{ und } (21)$$

$$E(t+h) = E(t) + \frac{K_1}{6} + \frac{K_2}{3} + \frac{K_3}{3} + \frac{K_4}{6}$$

5

Da $T_R \ll \tau_L$ ist, kann man die Änderungen eines Resonatorumlaufs in einem Schritt mit $h=T_R$ berechnen. Ein Zyklus besteht also in der Auswertung von Gl. (2) in Phase 1 und der numerischen Lösung der Differentialgleichung während Phase 2. Als Werte am Beginn jedes Zyklus' werden $E(0)=E_{seed}$, $g(0)=g_2$ mit dem Gewinn g_2 vom Ende des letzten Zyklus gewählt. Es ergibt sich am Ende des Verstärkungszyklus die Pulsenergie $E=E(T_K)$ des resultierenden hochenergetischen Laserpulses und die verbleibende Verstärkung $g_2=g(T_K)$. Bei aufeinanderfolgenden Zyklen gibt es also eine Folge von Pulsenergien E_i und eine korrespondierende Folge von „Restgewinn-Parametern“ g_i .

20 Mit diesem Ansatz und dessen numerischer Lösung können das Auftreten von Instabilitäten bzw. Bifurkationen analysiert werden, so dass entweder Regelungsmechanismen abgeleitet werden können, die einen stabilen Betrieb eines

Regenerativen Verstärkers ermöglichen. Auf der anderen Seite können auch solche Laser entworfen werden, die von vorneherein aufgrund ihrer Parameterkonstellation ein stabiles Verhalten auch im hochrepetitiven Bereich erwarten lassen.

Ziel ist es, einen Regenerativen Verstärker zu erhalten, welcher mit einer Schaltfrequenz ≥ 20 kHz getreu der Ansteuerfrequenz schaltet, d.h. es soll keine Periodenvervielfachung auftreten. Im allgemeinen Fall kann dazu einer der in Fig.11 bis Fig.13 dargestellten Regelungsmechanismen verwendet werden. Alternativ kann jedoch die Auslegung gemäss der erwähnten Parameterkonstellation zur Erfüllung dieser Anforderung führen.

Als wichtigste Parameter für den stabilen Betrieb können die Inversionslebensdauer τ_u und die Schalt-Gatelänge betrachtet werden. Für Produkte aus Repetitionsfrequenz und Inversionslebensdauer, für die $f_{rep} \cdot \tau_u \geq 10$ gilt, wird ein stabiler Betrieb bei ansonsten typischen Laser- und Resonatorparametern erreicht. Diese typischen Parameter liegen beispielsweise bei

$$\begin{aligned} l &\approx 5 \% \\ g_0 &\approx 0.1 \dots 0.5 \\ \sigma_e &\approx 0.1 \dots 5 \cdot 10^{-20} \text{ cm}^2 \end{aligned}$$

Dies gilt vor allem auch für Gatelängen, welche zur maximalen möglichen Energieausbeute führen. Der Hauptgrund dafür ist die vernachlässigbare Gain-Dynamik zwischen den Gates. Aufgrund $1/f_{rep} \ll \tau_u$ ändert sich der Gain zwischen aufeinanderfolgenden Gates kaum. Einige Beispiele für

Lasermaterialien, welche für den Betrieb bei $f_{rep} > 20 \text{ kHz}$ geeignet sind, können wie folgt angegeben werden

- Yb:QX (Glass), $\tau_u = 2000 \mu\text{s}$
- 5 - Yb:LG760 (Glass), $\tau_u = 1300 \mu\text{s}$
- Yb:YAG (Kristall), $\tau_u = 1 \text{ ms}$
- Yb:GdCOB (Kristall), $\tau_u = 2 \text{ ms}$
- Er:QX (Glass), $\tau_u = 7,9 \text{ ms}$

- 10 Wird ein Regenerativer Verstärker mit einem Lasermedium, das eine lange Speicherzeit bzw. Inversionslebensdauer τ_u aufweist, mit kurzen Gatelängen betrieben, entsteht der vorteilhafte Nebeneffekt, dass der Einschaltimpuls trotz der gespeicherten Energie nicht zu energetisch wird und
- 15 dadurch keine Schädigungen des Materials entstehen.

- Der erfindungsgemäße Regenerative Verstärker kann grundsätzlich mit allen Konzepten einer gattungsgemäßen Laseranordnung, insbesondere bezüglich der Erzeugung und
- 20 Einkopplung von Seed-Pulsen, kombiniert werden. Eine weitere Ausführungsform einer erfindungsgemäßen Laseranordnung beinhaltet einen ungesättigten Cavity-Dumper als Auskoppelkomponente. Klassische Cavity-Dumper arbeiten im gesättigten Zustand, d.h. der Laser-Gain ist gesättigt,
- 25 wobei dies durch parasitäre Verluste und das zyklisch erfolgende Auskoppeln von Strahlungsenergie aus dem Resonator bestimmt wird. Im modengekoppelten Betrieb wird bei der Verwendung einer solchen Komponente ein quasi-stationär umlaufender Puls erzeugt, von dem zyklisch
- 30 Anteile ausgekoppelt werden. Aufgrund der geringen Wiederholrate ist der Vorgang quasi-stationär und wiederholt durchfahrbar. Im Gegensatz zu klassisch-

gesättigten Cavity-Dumpfern erfolgt erfindungsgemäss ein Betrieb im nicht-gesättigten Zustand. Die unvollständige Auskopplung des umlaufenden Pulses führt zum Verbleib eines Restanteils im Resonator, wobei dieser Restanteil zum
5 Aufbau eines internen Seed-Pulses genutzt wird.

Damit bestehen drei verschiedene Möglichkeiten des Pulsaufbaus in einem erfindungsgemäßen Regenerativen Verstärker

10

- Erzeugung eines externen Seed-Pulses mit einer Femto- oder Picosekundenquelle,
- Erzeugung eines intern generierten Seed-Pulses aus einem vorhergehenden Puls durch unvollständige
15 Auskopplung nach dem erfindungsgemäßen Prinzip des ungesättigten Cavity-Dumpers und
- Aufbau eines intern generierten Pulses aus dem Rauschen.

20 Für die beiden Konzepte mit intern generierten Seed-Pulsen ist eine Beeinflussung des Strahlungsfeldes bzw. der Pulsform Voraussetzung für einen Aufbau des Pulses. Diese Beeinflussung kann insbesondere durch einen sättigbaren Absorber-Spiegel, ggf. ergänzt durch ein
25 Dispersionsmanagement erfolgen.

Die Ergebnisse der numerischen Simulation und die erfindungsgemässe Vorrichtung bzw. das erfindungsgemäße Verfahren werden nachfolgend anhand von in der Zeichnung
30 schematisch dargestellten Beispielen rein beispielhaft näher beschrieben. Im einzelnen zeigen

Fig.1 die schematische Darstellung eines Aufbaus eines Regenerativen Verstärkers des Stands der Technik;

- Fig.2 die schematische Darstellung der relevanten Zeitkonstanten des Verstärkers;
- 5 Fig.3 den Verlauf des Gewinnparameters als Funktion der Gatelänge für unterschiedliche Pulswiederholraten;
- 10 Fig.4 den Verlauf der Pulsenergie als Funktion der Gatelänge für unterschiedliche Pulswiederholraten;
- Fig.5A-F die Abhängigkeit der Gatelänge an der Schwelle der Bifurkationen von den relevanten Parametern;
- 15 Fig.6 die extrahierte Pulsenergie als Funktion des Anfangsgewinns;
- Fig.7a-f die extrahierte Pulsenergie als Funktion der Gatelänge für verschiedene Kleinsignalverstärkungen;
- 20 Fig.8A-E die extrahierte Pulsenergie als Funktion der Gatelänge für verschiedene Kleinsignalverstärkungen in Nd:YVO mit und ohne Gewinnregelung;
- 25 Fig.9A-E die extrahierte Pulsenergie als Funktion der Gatelänge für verschiedene Kleinsignalverstärkungen in Yb:QX mit und ohne Gewinnregelung;
- 30 Fig.10 die extrahierte Pulsenergie als Funktion der Gatelänge mit einer Regelung der Gatelänge;

- Fig.11 die schematische Darstellung einer ersten Ausführungsform eines geregelten Regenerativen Verstärkers;
- 5 Fig.12 die schematische Darstellung einer zweiten Ausführungsform eines geregelten Regenerativen Verstärkers;
- 10 Fig.13 die schematische Darstellung einer dritten Ausführungsform eines geregelten Regenerativen Verstärkers und
- 15 Fig.14 die schematische Darstellung einer vierten Ausführungsform eines geregelten Regenerativen Verstärkers nach dem Prinzip des ungesättigten Cavity-Dumpers.

In Fig.1 wird der schematische Aufbau eines Beispiels für einen Regenerativen Verstärker dargestellt. Ein polarisierter Seed-Laserpuls von einer Seed-Laserquelle wird über einen Polarisator 5 in die Anordnung eingekoppelt und wird von einem Spiegel 2 nach dem Durchgang durch einen elektrooptischen Modulator 1, wie z.B. eine Pockels-Zelle, und ein Viertelwellenplättchen 6 reflektiert. In Abhängigkeit von der an den elektrooptischen Modulator 1 angelegten Spannung wird die Polarisationssebene des Laserstrahls gedreht, so dass der Polarisator 5 passiert werden kann. Durch eine entsprechende Schaltung können damit sowohl Pulse in die Anordnung ein- als auch als Laserpuls 8 ausgekoppelt werden. Der elektrooptische Modulator 1 bildet damit im Zusammenspiel mit dem Polarisator 5 einen extern steuerbaren Schalter, durch den ein Lichtpuls wahlweise ein- und ausgekoppelt und die Resonatorgüte gesteuert werden kann. Ist ein Puls

eingekoppelt und damit innerhalb des Resonators gefangen, wird er bei jedem Durchgang durch das Lasermedium 4 verstärkt, wobei mehrfache Reflexionen an Faltspiegeln 3 erfolgt. Das Lasermedium 4 wird durch eine externe, hier nicht dargestellte, Lichtquelle optisch gepumpt. Nach einer gewissen Anzahl von Resonatorumläufen und Durchgängen durch das verstärkende Lasermedium 4 wird der Puls durch eine erneute Rotation der Polarisierung durch Schalten des elektrooptischen Modulators 1 über den Polarisator 5 als Laserpuls S ausgekoppelt. Diese Anordnung stellt lediglich ein Beispiel für einen Regenerativen Verstärker dar. Andere konkrete Anordnungen können unter Verwendung alternativer oder ergänzender Komponenten, wie z.B. akusto-optischer Modulatoren oder dispersionsbeeinflussender Elemente, modifiziert werden.

In Fig.2 werden die relevanten Zeitkonstanten des Regenerativen Verstärkers schematisch dargestellt. Diese sind: Die Gatelänge $T_G = n \cdot T_R$ ist ein ganzzahliges Vielfaches der Umlaufzeit T_R des Lichtpulses im Verstärker. Die Pulswiederholrate ist bestimmt durch T_K .

Fig. 3 zeigt den Verlauf der Rest-Gewinnfolge, also des „Restgewinns“ im eingeschwungenen Zustand als Funktion der Gatelänge T_G für unterschiedliche Pulswiederholraten $1/T_K$. Die Parameter sind

$$g_0 = 0.15$$

$$l = 0.04$$

$$T_R = 1/75 \text{ MHz}$$

Fig.4 zeigt für den gleichen Parametersatz wie in Fig.3 den Verlauf der Pulsenergie E_i als Funktion der Gatelänge T_g für unterschiedliche Pulswiederholraten $1/T_K$.

5 Unabhängig von der Pulswiederholrate $1/T_K$ konvergieren alle drei dargestellten Kurven für kleine Gatelängen gegen den Kleinsignalgewinn g_0 . In dem Fall ist die Zahl der Resonatorumläufe so klein, dass der Puls nicht in der Lage ist, den Gewinn signifikant abzubauen. Erst bei Erhöhung
10 der Gatelänge (=Zahl der Umläufe im RV) wird Gewinn abgebaut, und substantielle Pulsenergie extrahiert. Der Abbau des Gewinns verläuft für alle drei dargestellten Situationen ungefähr mit der gleichen Steigung, trotzdem sind die bei niedrigeren Repetitionsraten $1/T_K$
15 extrahierbaren Energien größer, da sich der Gewinn zwischen den Gates weiter erholen kann. Bei mittleren Restgewinnen tritt die erste Bifurkation auf: Die Pulsenergie und der Restgewinn vollziehen eine Periodenverdopplungssequenz. Das bedeutet, dass auf einen Puls mit hoher Energie, ein Puls
20 mit niedriger Energie folgt und so weiter (P2, zweifach periodisch). Der Restgewinn oszilliert im Gegentakt. In diesem Sinne sind die Bifurkationsdiagramme Fig.3 und Fig.4 zu verstehen. Später wird das Verhalten vierfach periodisch, und mit geeigneten Parametern werden noch
25 höhere Subharmonische und Chaos beobachtet. Dass vor allem bei kleineren Repetitionsraten das erwartete Maximum der extrahierbaren Pulsenergie genau im instabilen Bereich liegt, verdeutlicht das Problem für die Anwendung und verlangt nach Strategien, die Instabilitäten zu vermeiden.
30 Das soll in einem späteren Abschnitt behandelt werden. Im folgenden Abschnitt soll die Parameterabhängigkeit des Bifurkationspunktes T_b , also des Schwellwertes der

Gatelänge zwischen Stabilität und Instabilität systematisch untersucht werden.

Fig.5A-F zeigen die Abhängigkeit der Gatelänge an der
5 Schwelle der Bifurkation von den relevanten Parametern,
deren kritische Konstellation wie folgt lautet

$$E_{seed} = 1 \text{ nJ}$$

$$l = 4\%$$

$$g_0 = 0.15$$

$$T_K = (5 \text{ kHz})^{-1}$$

$$T_R = (75 \text{ MHz})^{-1}$$

10 Fig.5A-F verdeutlichen die Abhängigkeit der
Instabilitätsschwelle, also der Gatelänge an der
Bifurkation, von den verschiedenen Parametern. Die
Abbildung veranschaulicht, dass die Seed-Energie E_{seed} , die
Resonatorumlaufzeit T_R , und die linearen Verluste l nur
15 kleinen Einfluss auf das Einsetzen der Bifurkation haben.
Wie aus den unteren Teilbildern hervorgeht, sind die
wesentlichen Parameter der Kleinsignalgewinn g_0 und die
Repetitionszeit T_K . Die eigentlich relevante Größe ist der
Gewinn g_2 am Anfang des Zyklus. Fig.5F zeigt die
20 Instabilitätsschwelle als Funktion von g_2 , einmal
resultierend aus der Variation von g_0 (oberer Ast) und
parallel korrespondierend zur Variation der Repetitionsrate
(unterer Ast). Die Übereinstimmung der beiden Kurven
belegt, dass g_0 und T_K nur insofern relevant sind, wie sie
25 auf g_2 wirken.

Dass die extrahierte Energie linear mit dem Anfangsgewinn
 g_2 anwächst, wie in Fig.6 gezeigt, verdeutlicht die

Notwendigkeit, für maximale Verstärkung den RV nahe am instabilen Bereich zu betreiben. Weiter geht aus Fig.4 hervor, dass - besonders für kleine Repetitionsraten - das Maximum der extrahierbaren Pulsenergie genau im instabilen Bereich liegt. Daraus folgt die Notwendigkeit einer Stabilisierung.

Für eine erfolgreiche Stabilisierung sind zwei Dinge erforderlich: Erstens ein Fehlersignal, das die Abweichung des Ist- von einem Soll-Wert wiedergibt, und zweitens eine Stellgröße, an der der Ist-Wert gesteuert werden kann. Im Falle des RV kann das Fehlersignal durch Vergleich der extrahierten Pulsenergie mit einem extern vorgegebenen Sollwert oder mit der vorhergehenden Energie auf einfache Weise erzeugt werden. Für die Stellgröße gibt es ein paar Möglichkeiten, die allerdings unterschiedliche Eignungen aufweisen. Eine Regelung über die Seed-Energie wäre nach den Berechnungen zu Fig.5A-F nur eingeschränkt geeignet. Eine Regelung über die Umlaufzeit bzw. die Repetitionsrate soll in diesem Beispiel nicht näher analysiert werden, so dass diese Größen hier als fest vorgegeben betrachtet und deshalb nicht weiter berücksichtigt werden sollen. Grundsätzlich kann jedoch auch die Repetitionsrate, wie weiter unten dargestellt, variiert werden.

Es bleiben zwei bevorzugt verwendbare Stellgrößen übrig: Der Kleinsignalgewinn g_0 und die Gatelänge T_G . Der Kleinsignalgewinn ist linear mit dem Anfangsgewinn g_2 und damit gemäß Fig.6 auch linear mit der Pulsenergie verknüpft. Allerdings muss zur Regelung von g_0 die Pumpleistung gesteuert werden, was entweder einen AOM/EOM im Pumpstrahl oder eine direkte Regelung des - oftmals hohen - Diodenstroms erfordert. Eine Regelung über die

- Gatelänge T_G ist praktisch nicht allzu schwer umzusetzen, trifft aber auf ein anderes Problem: Je nach Arbeitspunkt kann die Ableitung $\frac{dE}{dT_G}$ positiv oder negativ sein (siehe z.B. Fig.4). Besonders im Maximum, also bei der gewünschten maximalen extrahierten Pulsenergie verschwindet die Ableitung. Gerade im optimalen Arbeitspunkt ist also eine Regelung über die Gatelänge nur eingeschränkt realisierbar. Beide Fälle im Folgenden diskutiert werden.
- 10 Auf den ersten Blick sind die Grundzüge einer derartigen Regelung offensichtlich: Die Differenz aus zwei aufeinanderfolgenden Pulsenergien $E_i - E_{i-1}$ wird mit geeigneter Regelverstärkung zur Erhöhung/Erniedrigung des Kleinsignalgewinns um ein Δg_0 für den nächsten Zyklus
- 15 genutzt. Diese einfachste Version eines D-Reglers muss hier allerdings die Bifurkation - im P2-Bereich - berücksichtigen, um die dynamische Instabilität nicht weiter zu verstärken. Wenn sie nämlich nach großer positiver Änderung den Gewinn reduzieren würde, würde der
- 20 folgende Puls dann umso kleiner werden. Die Regelung muß also auf positive Änderung der Energie mit Erhöhung des Gewinns reagieren. In Formeln:

$$\Delta g_0 = F_1 \cdot (E_i - E_{i-1}) \quad (22)$$

- 25 mit einer geeigneten positiven Regelverstärkung F_1 . Mit einer zusätzlichen Limitierung der Gewinnänderung ergeben sich die Bifurkationsdiagramme in Fig.7a-f, in den Fig.7a,c,e ohne Regelung, in den Fig.7b,d,f mit ihr. Die
- 30 Figuren verdeutlichen die Wirksamkeit der Regelung. In den Fig.7a-f sind jeweils die extrahierten Pulsenergien als Funktion der Gatelänge für verschiedene

Kleinsignalverstärkungen dargestellt. Dabei entsprechen die vier unterschiedlichen Kurven - nach ihren Bifurkationspunkten von links nach rechts geordnet - einem g_0 von 0.1, 0.15, 0.2 und 0.25. Es besitzen als Parameter

5 die

Fig. 7a-b $T_K = (5 \text{ kHz})^{-1}$
 $F_1 = 500 \text{ J}^{-1}$

Fig. 7c-d $T_K = (10 \text{ kHz})^{-1}$
 $F_1 = 600 \text{ J}^{-1}$

10

Fig. 7e-f $T_K = (15 \text{ kHz})^{-1}$
 $F_1 = 600 \text{ J}^{-1}$

Die übrigen Parameter entsprechen denen aus Fig. 5A-F.

15 Auch für andere Materialien

Nd:YVO

$$\lambda = 1064 \text{ nm}$$

$$\tau_L = 0.1 \text{ ms}$$

$$\sigma = 14 \cdot 10^{-23} \text{ m}^2$$

$$A_{\text{eff}} = 392500 \text{ } \mu\text{m}^2$$

$$T_R = (100 \text{ MHz})^{-1}$$

Yb:QX

$$\lambda = 1040 \text{ nm}$$

$$\tau_L = 2.0 \text{ ms}$$

$$\sigma = 0.15 \cdot 10^{-24} \text{ m}^2$$

$$A_{\text{eff}} = 10000 \text{ } \mu\text{m}^2$$

$$T_R = (70 \text{ MHz})^{-1}$$

funktioniert die Regelung einwandfrei. In einigen Fällen ist es möglich, die Instabilitätsschwelle so weit zu verschieben, dass das Maximum der extrahierbaren Pulsenergie ohne Instabilitäten erreichbar ist.

5

Fig.8A-E zeigen die extrahierte Pulsenergie als Funktion der Gatelänge für verschiedene Kleinsignalverstärkungen in Nd:YVO mit (Fig.8C,E) und ohne (Fig.8A,B,D) Gewinnregelung. Dabei entsprechen die vier unterschiedlichen Kurven - nach
10 ihren Bifurkationspunkten von links nach rechts geordnet - einem g_0 von 1 bis 1.8. Es besitzen als Parameter die

Fig.8A $T_K = (10 \text{ kHz})^{-1}$

15 Fig.8B-C $T_K = (25 \text{ kHz})^{-1}$
 $F_1 = 500 \text{ J}^{-1}$

Fig.8D-E $T_K = (100 \text{ kHz})^{-1}$
 $F_1 = 650 \text{ J}^{-1}$

Fig.9A-E stellen die extrahierte Pulsenergie als Funktion
20 der Gatelänge für verschiedene Kleinsignalverstärkungen in Yb:QX mit (Fig.8B,D) und ohne (Fig.8A,C,E) Gewinnregelung. Dabei entsprechen die vier unterschiedlichen Kurven - nach ihren Bifurkationspunkten von links nach rechts geordnet - einem g_0 von 0.2 bis 0.26. Es besitzen als Parameter die

25

Fig.8A-B $T_K = (5 \text{ kHz})^{-1}$
 $F_1 = 50 \text{ J}^{-1}$

Fig. 8c-D $T_K = (10 \text{ kHz})^{-1}$
 $F_1 = 50 \text{ J}^{-1}$

Fig. 8E $T_K = (20 \text{ kHz})^{-1}$
 $F_1 = 50 \text{ J}^{-1}$

5 Mit

$$\Delta T_G = F_2 \cdot (E_i - E_{i-1}) \quad (23)$$

lässt sich analog zum obigen Fall eine Regelung der
 10 Gatelänge um ΔT_G realisieren. Allerdings gelten dafür die
 oben dargelegten Limitierungen, die sich durch die
 verschwindende Steigung im Optimum ergeben. Mit $F = 0.0173 \frac{\text{s}}{\text{J}}$
 und einer zusätzlichen Limitierung der Gatelänge

15 $|\Delta T_G| < \frac{T_G}{4} \quad (24)$

ergibt sich eine „Stabilisierung“, wie sie in Fig.10
 dargestellt ist. Hier wird die extrahierte Pulsenergie als
 Funktion der Gatelänge mit einer Regelung der Gatelänge
 20 dargestellt. Die Parameter entsprechen denen von Fig.5A-F.
 Die Resultate entsprechen denen von Fig.7a. Man erkennt eine
 deutliche Reduktion der Amplitude der Instabilität.

Es stellt sich also heraus, dass die Instabilität sehr gut
 25 über eine dynamische Regelung der Pumpenergie unterdrückt
 werden kann. Eine solche Regelung könnte sehr elegant und
 flexibel mit einer digitalen Signalverarbeitung (DSP) und
 einem geeigneten Stromtreiber realisiert werden. Die
 Anforderungen an die Regelbandbreite sind sehr gering, da

die Pulse mit großem zeitlichen Abstand emittiert werden. Die Regelung kann daher einfach realisiert werden und Treiber für sehr hohe Ströme sind problemlos verfügbar.

5 Fig.11 zeigt schematisch eine erste Ausführungsform eines über den Diodenstrom der Pumplichtquelle geregelten Regenerativen Verstärkers. Aufbau und grundlegende Funktionsprinzipien entsprechen der in Fig.1 dargestellten Anordnung, allerdings wurden einige Komponenten aus
10 Vereinfachungsgründen nicht dargestellt. In den Aufbau wird ein Puls über die Kombination von elektrooptischen Modulator 1 und Polarisator 5 eingekoppelt und damit innerhalb des Resonators gefangen, so dass er bei jedem Durchgang durch das Lasermedium 4' verstärkt wird, wobei
15 eine mehrfache Reflexionen an den Spiegeln 3' und 2 erfolgt. Das Lasermedium 4' wird durch eine externe Lichtquelle 9' mit einem Pumplichtstrahl P versorgt und somit optisch gepumpt. Nach einer gewissen Anzahl von Resonatorumläufen und Durchgängen durch das verstärkende
20 Lasermedium 4' wird der Puls über den Polarisator 5 als Laserpuls S ausgekoppelt. Die Energie bzw. Intensität dieses ausgekoppelten Laserpulses S wird über ein registrierendes Element, z.B. eine Photodiode 7, gemessen und das Signal an eine Regelungseinheit 8 weitergegeben. Je
25 nach Auslegung kann diese Regelungseinheit 8 als PID- oder PD-Regler ausgelegt sein oder aber auch komplexere Algorithmen zur Steuerung bzw. Regelung in analoger oder digitaler Technik enthalten. Über die Regelungseinheit 8 wird der Diodenstrom gesteuert, so dass der Pumplichtstrahl
30 P der nun als Modulatorelement betriebenen Pumplichtquelle 9' in seiner Intensität variiert bzw. moduliert werden kann.

In Fig.12 wird eine zweite Ausführungsform eines geregelten Regenerativen Verstärkers schematisch dargestellt. Die Regelung erfolgt in dieser Ausführungsform durch Ansteuerung des elektrooptischen Modulators 1a als
5 Modulatorelement, so dass eine Gatelängensteuerung, Verluststeuerung und/oder Repetitionsratensteuerung realisierbar ist. Wie in Fig.11 wird durch eine Photodiode 7 der ausgekoppelte Laserpuls S aufgenommen. Das Signal der Photodiode wird auf einen Regelungseinheit 8' geführt, die
10 beispielsweise als Pulse-Delay-Generator (PDG) bzw. als Modulatorregelung ausgebildet ist. Diese Regelungseinheit verändert über die Ansteuerung des elektrooptischen Modulators 1a entweder die Gatelänge, den Verlust im Resonator und damit den Gewinnparameter oder die
15 Repetitionsrate. Obwohl eine Regelung über nur einen Parameter aus Komplexitätsgründen die in den meisten Fällen geeignetste Lösung darstellen dürfte, können grundsätzlich aber auch verschiedene Regelungstypen kombiniert werden.

20 Fig.13 zeigt die schematische Darstellung einer dritten Ausführungsform eines geregelten Regenerativen Verstärkers mit einer Verlustregelung über einen weiteren Verlustmodulators 1b als Modulatorelement, z.B. in Form eines steuerbaren Spiegels mit variabler Reflektivität, was
25 beispielsweise mittels Stark-Effekt realisierbar ist. Die Regelung erfolgt nun in einer zur Fig.12 ähnlichen Weise über den zusätzlichen Verlustmodulator 1b, wobei das Ein- und Auskoppeln der Pulse weiterhin über den elektrooptischen Modulator 1 erfolgt, dessen Regelung hier
30 nicht dargestellt ist. Als Komponente zur Verlustmodulation können insbesondere Elemente eingesetzt werden, wie sie bei der Gütemodulation (Q-Switch) Verwendung finden.

Fig.14 zeigt die schematische Darstellung einer vierten Ausführungsform eines geregelten Regenerativen Verstärkers nach dem Prinzip des ungesättigten Cavity-Dumpers, der hier rein exemplarisch über eine Verlustregelung mit einem weiteren Verlustmodulator 1c als Modulatorelement verfügt. Diese Regelung ist aber nicht konstituierendes Merkmal des erfindungsgemäßen ungesättigten Cavity-Dumpers. Der Resonator, dessen eines Ende nun durch einen sättigbaren Absorberspiegel (SESAM) 3'' gebildet wird, weist ein Lasermedium 4', einen elektrooptischen Modulator 1 und einen Polarisator 5 auf. Vorteilhafterweise kann auch noch ein dispersives Element 10 zum Dispersionsmanagement, wie z.B. ein Doppelprisma oder ein Gires-Tournois-Interferometer, in den Resonator eingebracht werden. Weitere in der Fig.13 beinhaltete Komponenten werden aus Anschaulichkeitsgründen nicht dargestellt. Der Betrieb beginnt durch ein zyklisches Schalten des elektrooptischen Modulators 1. Bei erfindungsgemäss richtiger Wahl der Parameter, wie z.B. Gatelänge, Absorber-Modulationstiefe und Dispersionsmanagement baut sich während der Phase hoher Kreisgüte des Zyklus ein kurzer Puls auf, welcher dann aus dem Resonator ausgekoppelt wird. Ein Picosekunden-Betrieb mit und ohne Dispersionsmanagement ist ebenso realisierbar wie ein Femtosekunden-(Soliton)-Betrieb mit negativer Dispersion. Mit zusätzlicher Verlustmodulation und einem Auskoppelgrad von kleiner als 100 % kann der verbleibende Pulsteil als Seed-Puls für den nächsten Zyklus verwendet werden.

Es versteht sich, dass die dargestellten Figuren eine von vielen Ausführungsformen darstellen und der Fachmann alternative Realisierungsformen des Laseraufbaus, z.B. unter Verwendung anderer Laser-Set-ups oder Resonatorkomponenten, ableiten kann. Insbesondere ist es

möglich, die Schalt- und/oder Regelelemente über die angegebenen Beispiele hinaus anders zu gestalten, beispielsweise durch eine Verwendung von digitalen bzw. integrierten Steuerungen.

Patentansprüche

1. Verfahren zur Unterdrückung von Effekten nichtlinearer Dynamik in einer Laseremission (S), insbesondere eines
5 gepumpten Festkörperlasers, wobei wenigstens eine die Laseremission beeinflussende Stellgrösse in Abhängigkeit von wenigstens einem auf der extrahierten Pulsenergie der Laseremission (S) beruhenden
10 Fehlersignal dynamisch geregelt wird, so dass ein instabiles Verhalten der Laseremission (S) vermieden oder unterdrückt wird.
2. Verfahren nach Anspruch 1,
dadurch gekennzeichnet, dass
15 als Stellgrösse wenigstens eine der folgenden Grössen gewählt wird
 - o Kleinsignalgewinn,
 - o Gatelänge und/oder
 - o Repetitionsrate.
- 20 3. Verfahren nach Anspruch 2,
dadurch gekennzeichnet, dass
der Kleinsignalgewinn über ein Steuern der Pumpleistung und/oder des Verlusts im Resonator
25 verändert wird
4. Verfahren nach Anspruch 3,
dadurch gekennzeichnet, dass
der Kleinsignalgewinn gemäss der Beziehung
30 $\Delta g_0 = F_1 \cdot (E_i - E_{i-1})$ verändert wird, wobei Δg_0 die Änderung des Kleinsignalgewinns, F_1 eine positive

Regelverstärkung und E_i die Energie eines Pulses i bezeichnen.

5. Verfahren nach Anspruch 3 oder 4,
5 **dadurch gekennzeichnet, dass**
beim Steuern der Pumpleistung ein
- o Verlustmodulieren eines Pumpstrahls (P),
 - o Selektives Schalten diskreter Emitter und/oder
 - o Steuern des Diodenstroms
- 10 erfolgt.
6. Verfahren nach einem der Ansprüche 2 bis 5,
dadurch gekennzeichnet, dass
die Gatelänge gemäss der Beziehung $\Delta T_G = F_2 \cdot (E_i - E_{i-1})$
15 verändert wird, wobei ΔT_G die Änderung der Gatelänge,
 F_2 eine positive Regelverstärkung und E_i die Energie
eines Pulses i bezeichnen.
7. Verfahren nach Anspruch 6,
20 **dadurch gekennzeichnet, dass**
die Gatelänge gemäss der Beziehung $|\Delta T_G| < \frac{T_G}{4}$ limitiert
wird, wobei ΔT_G die Änderung der Gatelänge und T_G die
Gatelänge bezeichnen.
- 25 8. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche,
dadurch gekennzeichnet, dass
die Fehlergrösse auf wenigstens eine der folgenden
Arten erhalten wird
- o Vergleich der extrahierten Pulsenergie mit einem
- 30 extern vorgegebenen Sollwert und/oder

- o Vergleich der extrahierten Pulsenergie mit der Energie des vorhergehenden Pulses.

9. Steuerung zur Unterdrückung von Effekten nichtlinearer Dynamik in einer Laseremission (S) einer Laserquelle mit einer Pumplichtquelle (9) und einem Festkörperlasermedium (4,4'), insbesondere eines wiederherstellbaren Verstärkers, mit wenigstens
- einem registrierenden Element (7) zur Aufnahme eines auf der extrahierten Pulsenergie der Laseremission (S) beruhenden Fehlersignals,
 - einem Modulatorelement (1a,1b,1c,9') zur Beeinflussung der Laseremission (S),
 - einer Regelungseinheit (8,8',8'',8''') zur Steuerung des Modulatorelements (1a,1b,1c,9') in Abhängigkeit des Fehlersignals.
10. Steuerung nach Anspruch 9, **dadurch gekennzeichnet, dass**
- das Modulatorelement (1a,1b,1c,9') eines der folgenden Elemente ist
- ein intra- oder extra-cavity positionierter elektro- oder akustooptischer Modulator (1a,1b,1c),
 - ein als Modulatorelement (9') ausgebildete Pumplichtquelle, insbesondere mit regelbarem Diodenstrom oder selektiv schaltbaren, diskreten Emittern,
 - eine Komponente zur Verlustmodulation, insbesondere Spiegel mit steuerbar variabler Reflektivität,
 - eine Komponente zur Gatelängensteuerung,
 - eine Komponente zur Repetitionsratensteuerung.

11. Steuerung nach Anspruch 9 oder 10,
dadurch gekennzeichnet, dass
die Regelungseinheit (8,8',8'',8''') eines der
folgenden Elemente ist
- 5 - Pulse-Delay-Generator (8'),
 - Modulatorregelung (8'',8'''),
 - Diodenstromregler (8).
12. Hochrepetierender Laser, insbesondere nach dem Prinzip
10 eines wiederherstellbaren Verstärkers, mit einer
Steuerung nach einem der Ansprüche 9 bis 11.
13. Hochrepetierender Laser nach dem Prinzip eines
wiederherstellbaren Verstärkers,
15 **gekennzeichnet durch**
ein Lasermedium (4,4') mit einer Inversionslebensdauer,
die größer ist als der Quotient von 10 und der
Repetitionsfrequenz, wobei die Repetitionsfrequenz
größer als 20 kHz ist.
- 20
14. Laser, nach Anspruch 13,
dadurch gekennzeichnet, dass
das Lasermedium (4,4') eines der folgenden Materialien
ist
- 25 o Yb:QX Glas,
 o Yb:LG760 Glas,
 o Yb:YAG Kristall,
 o Yb:GdCOB Kristall oder
 o Er:QX Glas.
- 30
15. Laser, nach Anspruch 13 oder 14,
dadurch gekennzeichnet, dass

der Laser eine externe Femto- oder Picosekundenquelle zur Erzeugung eines Seed-Pulses aufweist.

16. Laser, nach Anspruch 13 oder 14,
5 **dadurch gekennzeichnet, dass**
der Laser als Cavity-Dumper mit einem Auskopplungsgrad von weniger als 100% ausgebildet ist, so dass ein interner Pulsaufbau aus einem verbleibenden Rest des Pulses erfolgt.
- 10 17. Laser, nach Anspruch 13 oder 14,
dadurch gekennzeichnet, dass
der Laser so ausgebildet ist, dass ein interner Pulsaufbau aus einem Rauschen erfolgt.
- 15 18. Laser, nach Anspruch 13 oder 14,
dadurch gekennzeichnet, dass
der Resonator einen sättigbaren Absorber (3'') und/oder ein dispersives Element (10) aufweist.
- 20 19. Verfahren zur Berechnung von Parametern für einen im Grenzbereich nichtlinearer Dynamik inhärent stabilen Laser nach dem Prinzip des wiederherstellbaren Verstärkers mit
- 25
 - einer Phase 1 ohne Auskopplung eines Laserpulses und
 - einer Phase 2 mit Auskopplung eines Laserpulses,wobei für
- 30
 - Phase 1 die Verstärkung am Ende der Phase 1
gemäss $g_2 = g_0 + (g_1 - g_0)e^{\left(\frac{T_K - T_G}{\tau_L}\right)}$ berechnet wird und
 - Phase 2 Leistungsgewinn $g(t+h)$ und Pulsenergie $E(t+h)$ mit einem zeitlichen Schritt h , insbeson-

dere mit $h = T_R$, aus $E(t)$ und $g(t)$ durch numerisches Lösen des Gleichungssystems

$$g(t+h) = g(t) + \frac{H_1}{6} + \frac{H_2}{3} + \frac{H_3}{3} + \frac{H_4}{6}$$

$$E(t+h) = E(t) + \frac{K_1}{6} + \frac{K_2}{3} + \frac{K_3}{3} + \frac{K_4}{6}$$

$$K_1 = hD_E(g(t), E(t))$$

$$H_1 = hD_g(g(t), E(t))$$

$$K_2 = hD_E\left(g(t) + \frac{H_1}{2}, E(t) + \frac{K_1}{2}\right)$$

$$H_2 = hD_g\left(g(t) + \frac{H_1}{2}, E(t) + \frac{K_1}{2}\right)$$

$$K_3 = hD_E\left(g(t) + \frac{H_2}{2}, E(t) + \frac{K_2}{2}\right)$$

$$H_3 = hD_g\left(g(t) + \frac{H_2}{2}, E(t) + \frac{K_2}{2}\right)$$

$$K_4 = hD_E(g(t) + H_3, E(t) + K_3)$$

$$H_4 = hD_g(g(t) + H_3, E(t) + K_3)$$

mit

$$\frac{dg}{dt} = \frac{g_0 - g}{\tau_L} - \frac{gE}{E_{sat}T_R} = D_g(g, E)$$

$$\frac{dE}{dt} = \frac{E}{T_R}(g - 1) = D_E(g, E)$$

berechnet werden, und

wobei für Phase 1 als Startwerte $E(0) = E_{seed}$, $g(0) = g_2$

mit dem Gewinn g_2 vom Ende einer vorhergehenden

Phase 1 gewählt werden und

τ_L die Fluoreszenz-Lebensdauer,

T_R die Umlaufzeit,

T_G die Gatelänge,

T_K eine die gewünschte Repetitionsrate vorgebende Zeitkonstante,

g den aus der Inversion resultierenden Gewinn,

g_0 die Kleinsignalverstärkung,

$g_1 = g(0)$ die Verstärkung am Beginn von Phase 1,

$g_2 = g(T_K - T_G)$ die Verstärkung am Ende von Phase 1,

E die Pulsenergie,

5 E_{seed} die Energie eines Seed-Pulses,

E_{Sat} die Sättigungsenergie des Lasermediums und

l Leistungsverluste im Resonatorumlauf

bezeichnen.

- 10 20. Computerprogrammprodukt mit Programmcode, der auf einem maschinenlesbaren Träger gespeichert oder durch eine elektromagnetische Welle verkörpert ist, zur Durchführung des Verfahrens nach Anspruch 19.

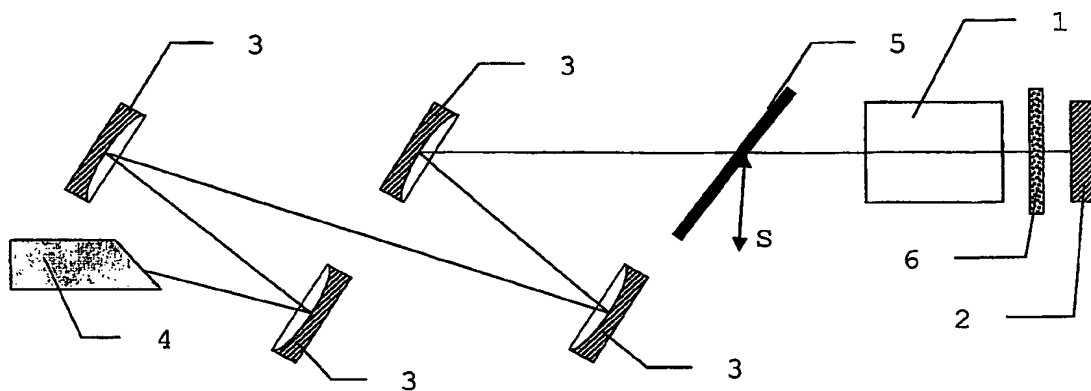


Fig. 1

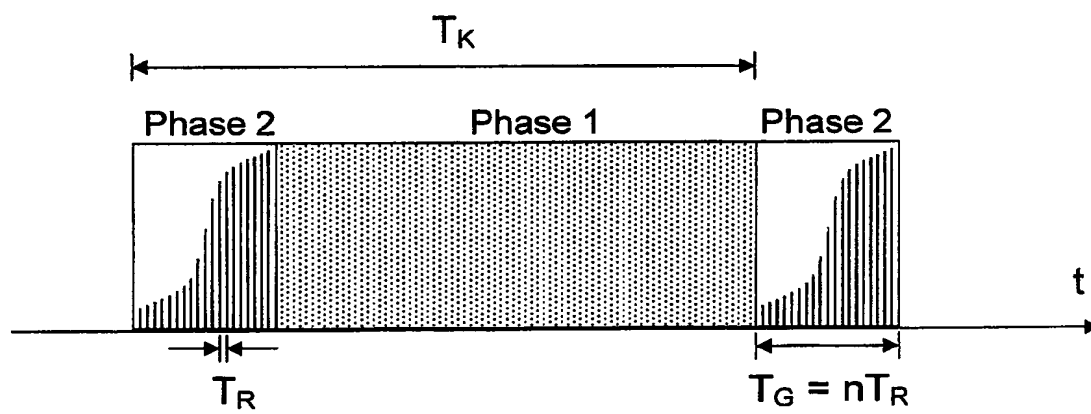


Fig. 2

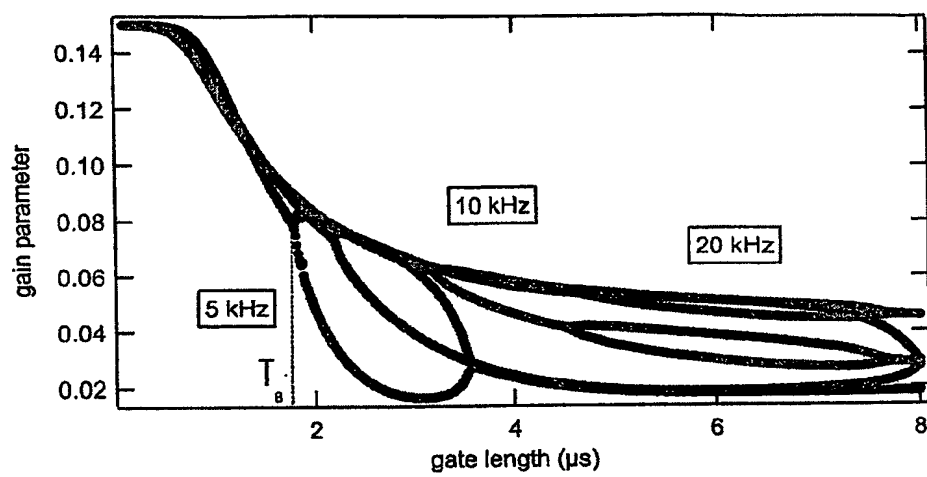


Fig. 3

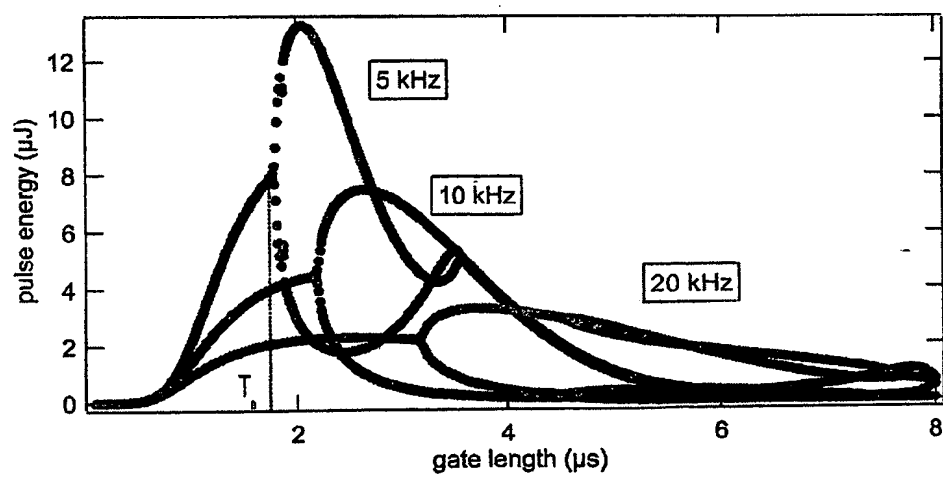


Fig. 4

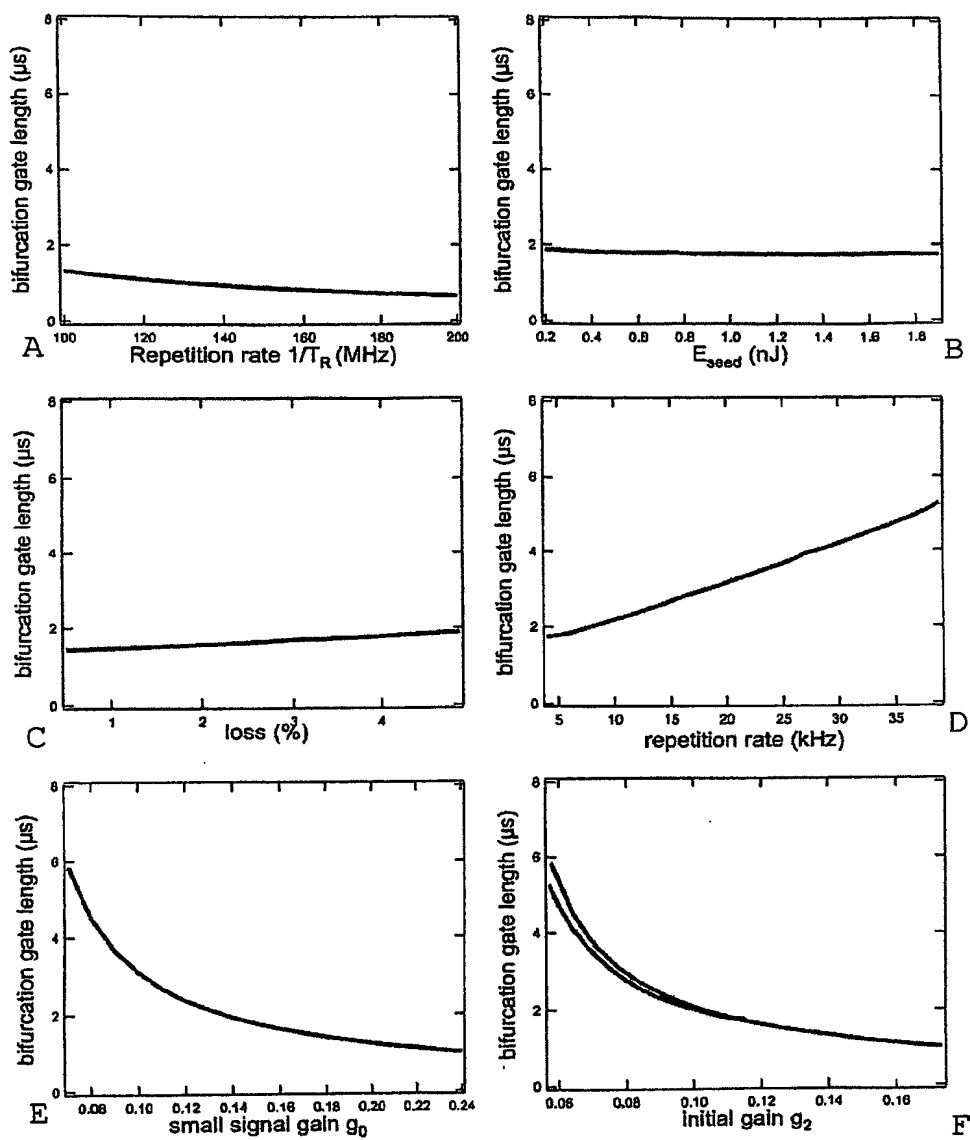


Fig. 5

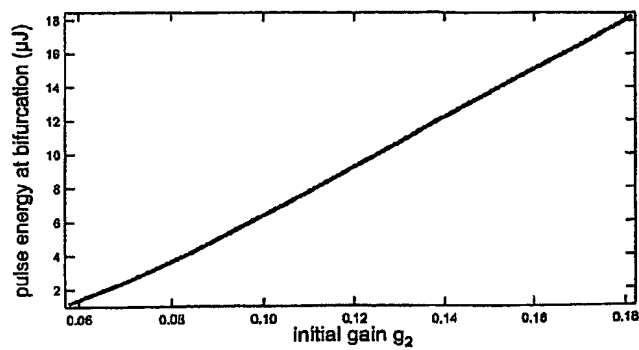


Fig. 6

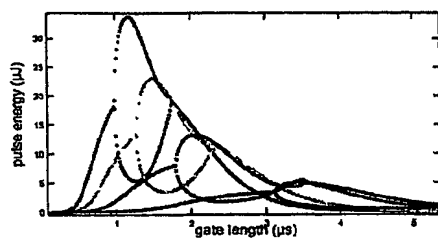


Fig. 7a

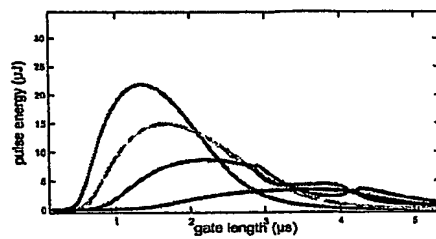


Fig. 7b

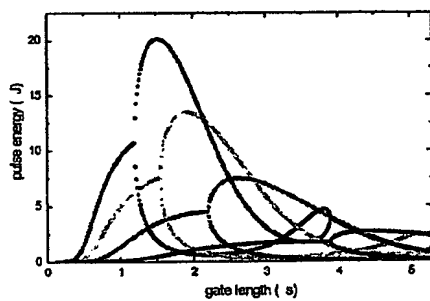


Fig. 7c

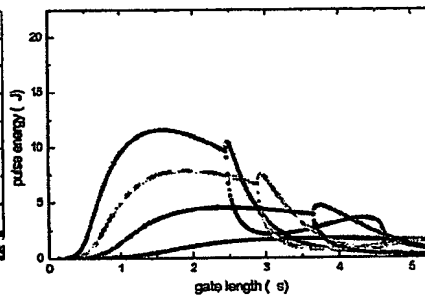


Fig. 7d

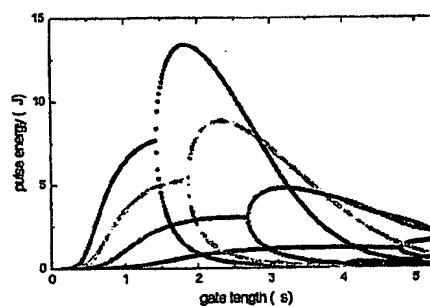


Fig. 7e

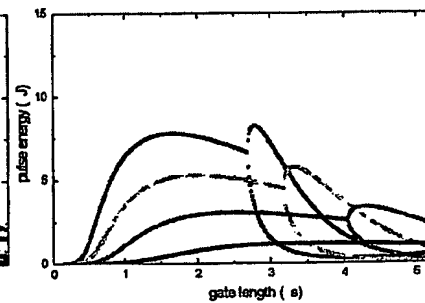


Fig. 7f

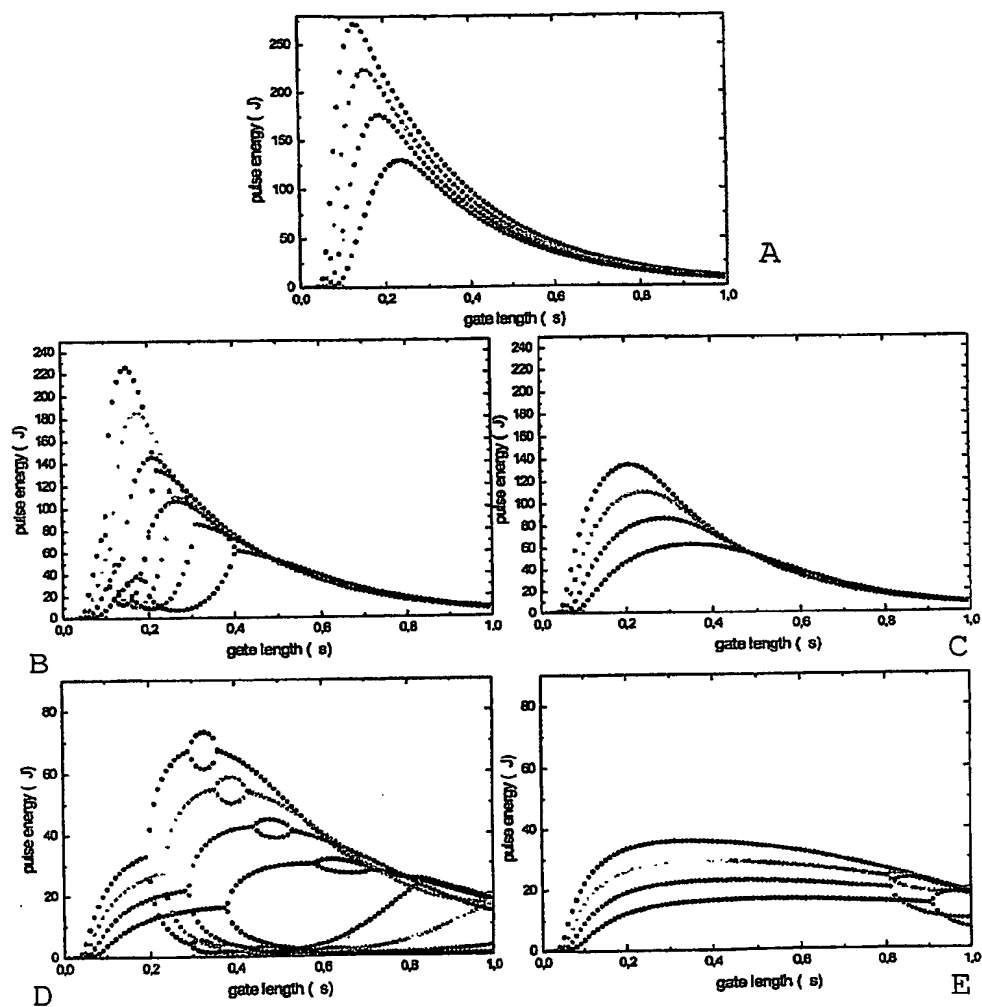


Fig. 8

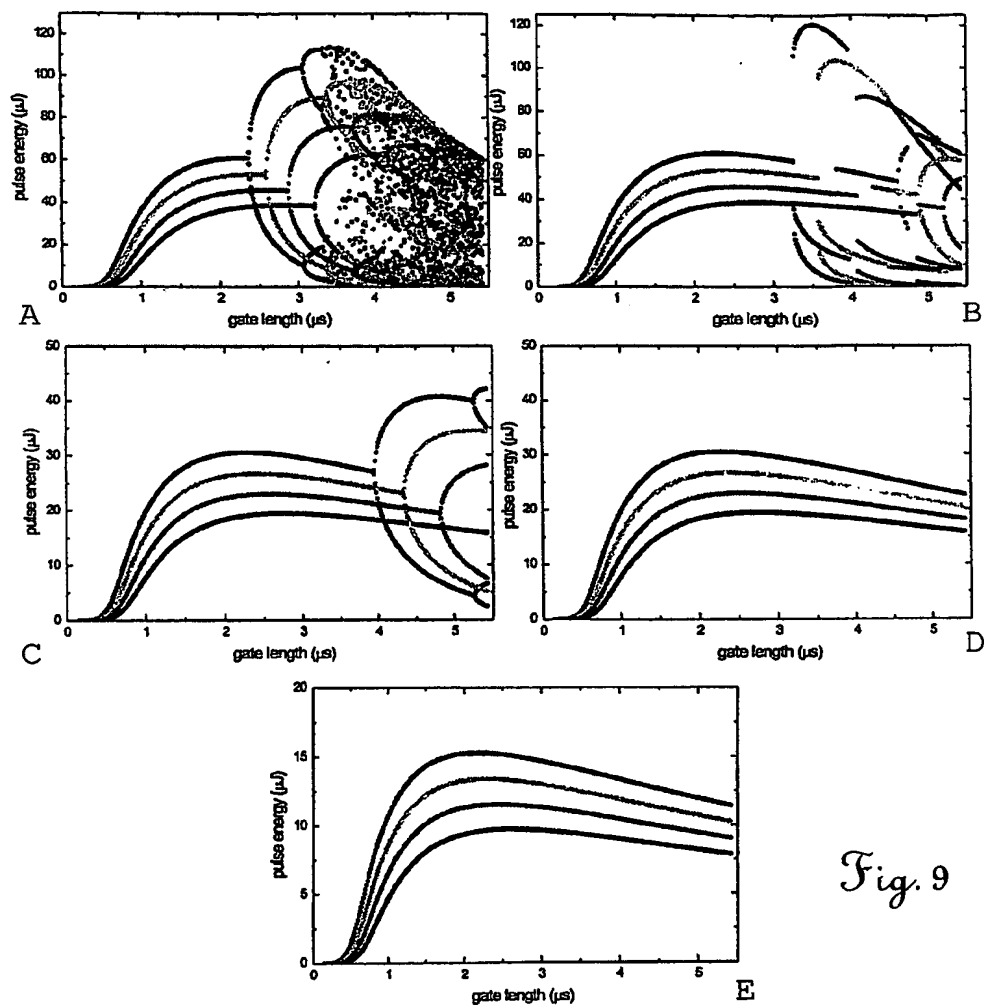


Fig. 9

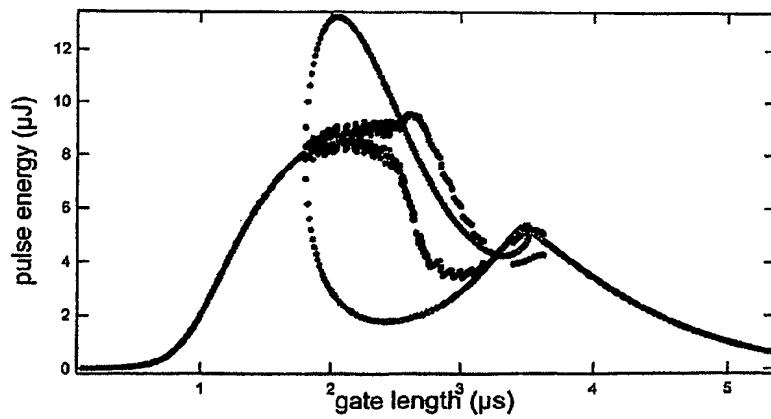
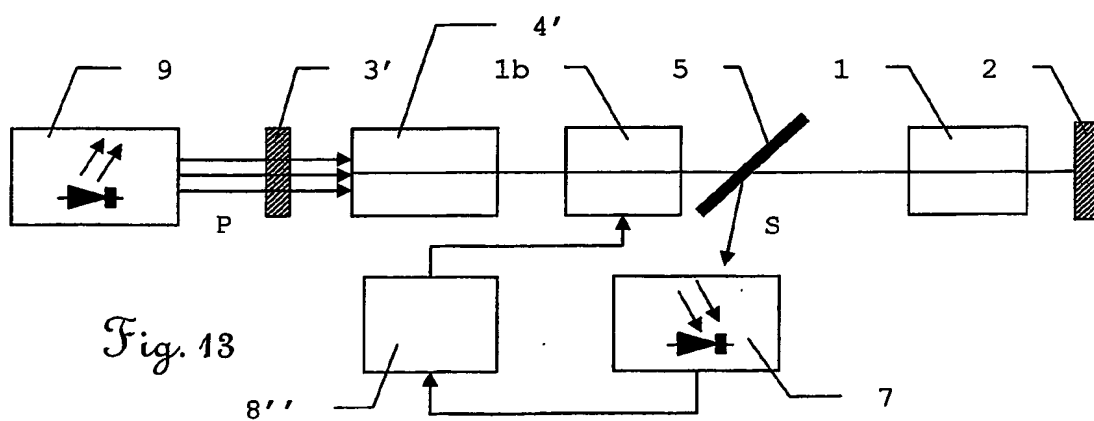
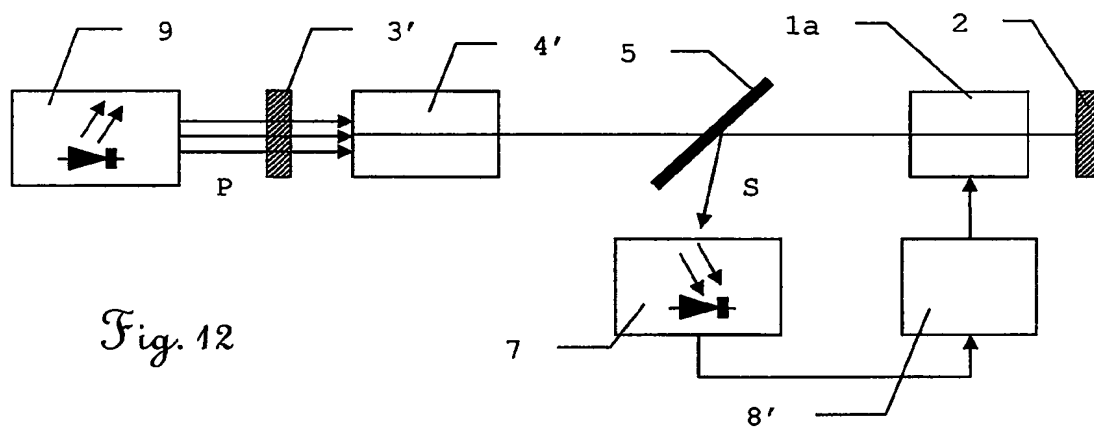
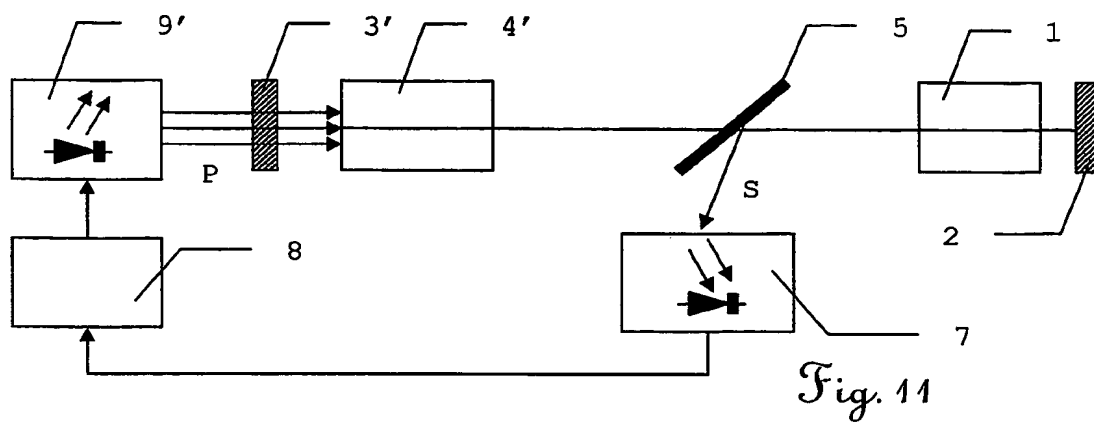


Fig. 10



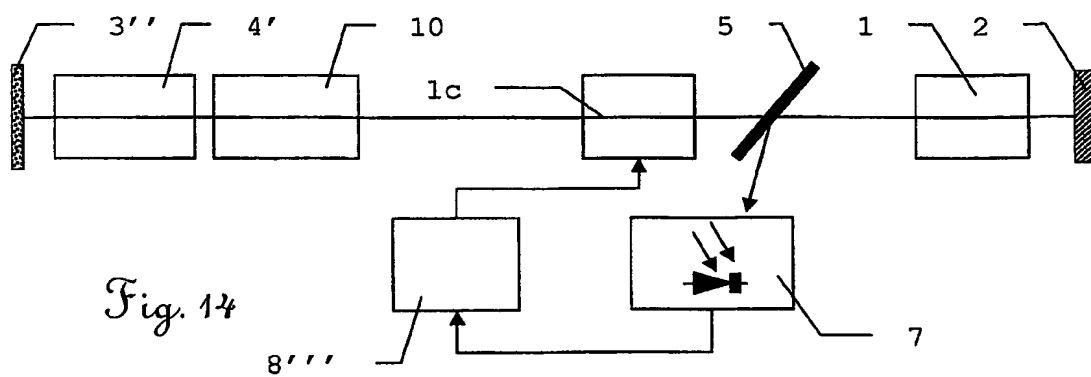


Fig. 14